

МОДЕЛИРОВАНИЕ НОЦИЦЕПТИВНОГО ФЛЕКСОРНОГО РЕФЛЕКСА НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Р.А. Якупов¹, А.А. Якупова²

¹ Поволжская государственная академия физической культуры, спорта и туризма, Казань, Россия

² Казанский государственный медицинский университет, Казань, Россия

Для связи с авторами: e-mail: ynctpsr@gmail.com

Аннотация:

Полисинаптические рефлексы, включая ноцицептивный флексорный рефлекс, являются двигательными реакциями организма на ноцицептивные раздражения. Они применяются в электрофизиологии для исследования состояния нервной системы при болевых синдромах, миофасциальных нарушениях, оценке функциональной готовности спортсменов. Однако принципы интерпретации показателей полисинаптических рефлексов требуют уточнения.

Создана компьютерная модель ноцицептивного флексорного рефлекса на основе технологии искусственных нейронных сетей. Установлено, что показатели латентности и длительности полисинаптических рефлексов определяются прежде всего функцией возбудимости интернейронов и мотонейронов, участвующих в реализации рефлекторного ответа.

Ключевые слова: ноцицептивный флексорный рефлекс, искусственная нейронная сеть, полисинаптическая рефлекторная возбудимость.

MODELING OF NOCICEPTIVE FLEXOR REFLEX ON THE BASIS OF ARTIFICIAL NEURON NETWORKS

R.A. Yakupov¹, A.A. Yakupova²

¹ Volga State Academy of Physical Culture, Sports and Tourism, Kazan, Russia

² Kazan State Medical University, Kazan, Russia

Abstract:

Polysynaptic reflexes, including the nociceptive flexor reflex, are the motor responses of the body to nociceptive stimuli. They are used in electrophysiology to study the state of the nervous system in case of pain syndromes, myofascial disorders, assessment of the condition of athletes. However, the principles of interpreting the parameters of polysynaptic reflexes need to be clarified.

A computer model of the nociceptive flexor reflex was developed on the basis of the technology of artificial neural networks. It has been established that latency and duration of polysynaptic reflexes are determined primarily by the function of excitability of interneurons and motoneurons involved in the implementation of the reflex response.

Key words: nociceptive flexor reflex, artificial neural network, polysynaptic reflex excitability.

ВВЕДЕНИЕ

Компьютерное моделирование находит все большее распространение при изучении центральной нервной системы (ЦНС) [1]. Одним из возможных его приложений является исследование нейронных сетей защитных полисинаптических рефлексов (ЗПР), представляющих собой двигательные реакции организма на ноцицептивные раздражения и применяемых в электрофизиологии для исследования состояния нервной системы, в частности, при развитии болевых

синдромов, миофасциальных нарушений и оценке функциональной готовности спортсменов [2, 4, 5, 6].

ЗПР включают в рефлекторную дугу интернейроны, задача которых не только передать афферентные импульсы к мотонейронам, но и обеспечить их анализ, чтобы сгенерировать адекватный моторный ответ в зависимости от множества информационных влияний со стороны других отделов ЦНС [7, 8].

ЗПР имеют следующие нейрофизиологические характеристики [3, 4, 7]:

- вызываются стимуляцией высокопороговых кожных и мышечных афферентных волокон;
- при раздражении локальных участков рецептивного поля двигательные ответы охватывают множество мышц;
- в рефлекторную дугу включается большой массив промежуточных нейронов как непосредственно на сегментарном уровне, так и в супрасегментарных отделах ЦНС, обеспечивая тем самым возможность генерализации двигательного ответа при интенсивных раздражениях;
- интеграция возбужденных нейронных сетей на разных уровнях обеспечивается проприоспинальными системами и спино-бульбо-спинальными связями;
- ЗПР обычно полифазны, имеют большую длительность разряда (десятки миллисекунд);
- вследствие наличия различных уровней замыкания при однократном раздражении может регистрироваться несколько вызванных ответов, отличающихся порогом возникновения и латентным периодом;
- при ритмической стимуляции обычно наблюдается подавление ЗПР;
- модуляция (торможение и облегчение) ЗПР осуществляется как на сегментарном уровне, так и со стороны супрасегментарных отделов ЦНС.

Нейрофизиологическими критериями повышения полисинаптической рефлекторной возбудимости (ПРВ) принято считать снижение порога возникновения рефлекса, укорочение его латентного периода, увеличение длительности, рост амплитуды и мощности ответа, а также снижение его подавления при ритмическом раздражении. Падение рефлекторной возбудимости характеризуется обратными сдвигами – повышением порога, увеличением латентности, сокращением длительности и уменьшением амплитуды, вплоть до полного угнетения рефлекса [3, 4].

Одним из часто исследуемых ЗПР является ноцицептивный флексорный рефлекс (НФР) (рисунок 1), который имеет два последовательных компонента – R2 и R3, и обычно регистрируется поверхностными электродами в короткой головке двуглавой мышцы бедра при электрической стимуляции икроножного

нерва в области латеральной лодыжки [2, 8]. Следует отметить, что вопросы клинико-нейрофизиологической интерпретации НФР и в общем ЗПР требуют дальнейших исследований. Вариабельность рефлексов, сложность интегративной оценки полифазных кривых, а также неопределенность в отношении сравнительной диагностической ценности тех или иных нейрофизиологических показателей затрудняет анализ ЗПР в клинической практике.

В связи с указанным целью работы явилось создание компьютерной модели НФР, предназначенной для интерпретации нейрофизиологических механизмов, лежащих в основе изменений латентных периодов и длительности вызванных ответов, установленных в процессе электрофизиологических исследований.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модель разрабатывалась с применением технологии объектно-ориентированного программирования на основе нейроморфологических и нейрофизиологических данных о связях нейронов НФР.

Были промоделированы 3 типа НФР – нормовозбудимый, гиперовозбудимый и гиповозбудимый, установленных при проведении реальных клинико-электрофизиологических исследований [2, 4, 5, 8]. «Нормовозбудимый» тип имеет средние значения латентности и длительности (рисунок 1). «Гиповозбудимый» тип отличается большой латентностью и малой длительностью (рисунок 2). «Гиперовозбудимый» тип характеризуется короткой латентностью и большой длительностью (рисунок 3) [4].

Для реализации модели был использован язык программирования Free Pascal, распространяемый на условиях GNU General Public License.

Основной объект модели – искусственный нейрон (ИН), который рассматривается как логический элемент со множеством входов и одним выходом. Нейроны подразделяются на три группы: сенсорные (входной слой), вставочные (внутренний слой – интернейроны) и моторные (выходной слой).

ИН объединены в импульсную искусственную нейронную сеть (ИНС), при этом вставочные нейроны организованы в слои от 1 до 10. Количество вставочных нейронов при моделировании ИНС варьировало от 15 до 500 ИН.

Рабочий цикл модели запускается «раздражением» сенсорных нейронов, которые активируют вставочные нейроны. Дальнейшее состояние ИНС определяется взаимодействием интернейронов, которое зависит от состояния их возбудимости (порога возбуждения и длительности рефрактерного периода). Активность вставочных нейронов конвергирует на мотонейроны, гистограмма ответов которых принимается в качестве аналога рефлекторного ответа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам анализа 1122 циклов моделирования НФР с различными параметрами порога и рефрактерности ИН было установлено:

- Механизм реализации гиповозбудимого типа НФР обусловлен снижением возбудимости интернейронов и мотонейронов. Увеличение латентного периода ПР ответа связано с падением эффективности проведе-

ния волны возбуждения по интернейронам, в результате чего ее передний фронт, конвергируя на мотонейронах, не в состоянии вызвать их разряда из-за недостаточного уровня суммации возбуждающих постсинаптических потенциалов. Указанный эффект также усиливается повышением порога возбудимости мотонейронов, что требует большего времени суммации потенциалов от интернейронов для генерации рефлекторного разряда. Сокращение длительности НФР связано, во-первых, с меньшим количеством интернейронов, участвующих в реализации НФР, поскольку ряд высокопороговых интернейронов не возбуждается; во-вторых, с уменьшением ритмической активности интернейронов вследствие возрастания их порога и рефрактерного периода; в-третьих, с увеличением порога возбудимости мотонейронов, которое ведет к расширению "подпороговой каймы" и, следовательно, к уменьшению количества двигательных клеток, участвующих в реализации рефлекса.

- Механизм реализации гипервозбудимого типа НФР обусловлен повышением возбудимости интернейронов и мотонейронов. Сокращение латентного периода представляет наиболее ранний эффект, связанный с повышением возбудимости интернейронов.

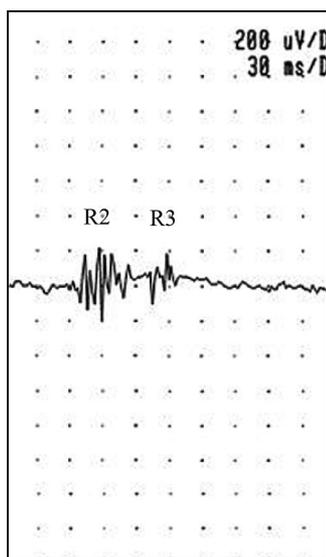


Рисунок 1 – НФР, «нормовозбудимый тип», R2 и R3 – компоненты НФР

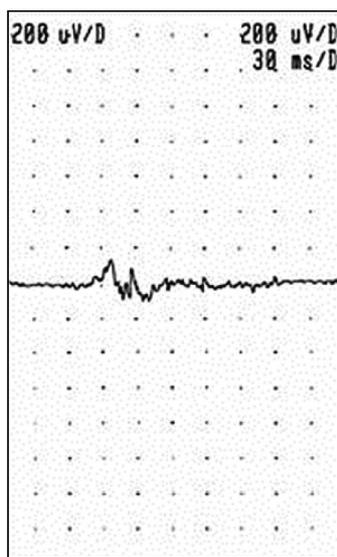


Рисунок 2 – НФР, «гиповозбудимый тип»

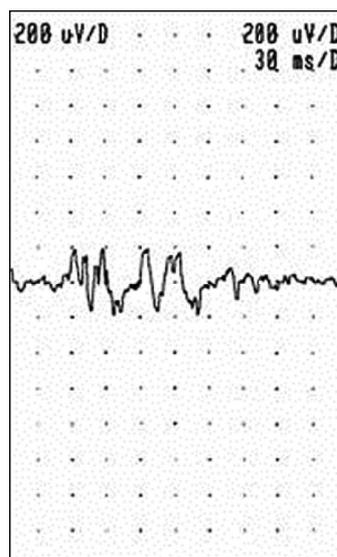


Рисунок 3 – НФР, «гипервозбудимый тип»

Компьютерное моделирование объясняет это возрастанием роли дальних связей интернейронов, в результате чего даже меньшая доза стимуляции эффективно возбуждает интернейроны удаленных групп посредством активации меньшего числа входов. Необходимо подчеркнуть, что существует естественный предел укорочения латентного периода ответа, обусловленный архитектурой связей и количеством переключений в цепи интернейронов. В предельном случае самая короткая латентность определяется активацией всех ближних связей и дальнейший рост возбудимости интернейронов уже не изменяет латентного периода НФР. Наиболее специфичной реакцией на повышение возбудимости интернейронов является рост длительности ответа. Во-первых, чем больше возбудимость интернейронов, тем больше их включается в рефлекторную дугу, вызы-

вая дисперсию возбуждающих стимулов на мотонейронах и пролонгируя рефлекторный ответ. Во-вторых, интернейроны способны к повторному возбуждению. Способность к ритмическому разряду связана с тем, что в интернейронах после каждого импульса не возникает длительного рефрактерного периода и поэтому они повторно и многократно возбуждаются в процессе реализации одного НФР.

ВЫВОДЫ

1. В результате компьютерного моделирования установлена зависимость изменений длительности и латентности НФР от функционального состояния ЦНС.
2. НФР может применяться для оценки процессов возбуждения и торможения в ЦНС на основе учета показателей длительности и латентности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белов, Н. Н. Компьютерное моделирование ориентировочного рефлекса / Н. Н. Белов // Современные проблемы науки. – 2011. – № 3. – С. 84-85.
2. Данилов, А. Б. Ноцицептивный флексорный рефлекс: метод изучения церебральных механизмов контроля боли (Обзор) / А. Б. Данилов, Ал. Б. Данилов, А. М. Вейн // Журн. неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. – 1996. – Т. 96, № 1. – С. 107-112.
3. Иваничев, Г. А. Мануальная терапия. Руководство, атлас / Г. А. Иваничев. – Казань, 1997. – 448 с.
4. Исмагилов, М. Ф. Головная боль напряжения / М. Ф. Исмагилов, Р. А. Якупов, А. А. Якупова. – Казань : Медицина, 2001. – 132 с.

BIBLIOGRAPHY

1. Belov, N. N. Computer simulation of the orienting reflex / N. N. Belov // Modern problems of science. – 2011. – № 3. – P. 84-85.
2. Danilov A. B. Nociceptive flexor reflex: a method of studying cerebral mechanisms of pain control (Review) / A. B. Danilov, Al. Danilov, A. M. Wayne // Zhurn. neurology and psychiatry S. S. Korsakova. – 1996. – T. 96, № 1. – P. 107-112.
3. Ivanichev, G.A. Manual therapy. Manual, atlas / G.A. Ivanichev. – Kazan, 1997. – 448 p.
4. Ismagilov, MF Headache of tension / M. F. Ismagilov, RA Yakupov, A. A. Yakupova – Kazan : Medicine, 2001. – 132 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Якупов Радик Альбертович (Yakupov Radik Albertovich) – доктор медицинских наук, директор учебно-научного центра технологий подготовки спортивного резерва Поволжской государственной академии физической культуры, спорта и туризма, email: r.a.yakupov@gmail.com
 Якупова Аида Альбертовна (Yakupova Aida Albertovna) – доктор медицинских наук, доцент Казанского государственного медицинского университета, email: doctorgy@mail.ru

5. Миофасциальный болевой синдром у спортсменов / Р. А. Якупов, Г. Г. Янышева, А. А. Якупова, К. П. Романов // Российский журнал боли. – 2015. – № 1 (46). – С. 82-83.
6. Николаев, С. Г. Практикум по клинической электромиографии / С. Г. Николаев. – Иваново, 2013. – 394 с.
7. Esteban A. A neurophysiological approach to brainstem reflexes. Blink reflex // Neurophysiol. Clin. – 1999, Feb. – Vol. 29, № 1. – P. 7-38.
8. Sandrini G., Alfonsi E., Ruiz L. et al. Age-related changes in excitability of nociceptive flexion reflex. An electrophysiological study in school-age children and young adults / G. Sandrini, E. Alfonsi, L. Ruiz et al. // Funct. Neurol. – 1989, Jan-Mar. – Vol. 4, № 1. – P. 53-58.
5. Myofascial pain syndrome in athletes / RA. Yakupov, G. G. Yanysheva, A. A. Yakupova, K. P. Romanov // Russian Journal of Pain. – 2015. – No. 1 (46). – P. 82-83.
6. Nikolayev, S. G. Workshop on clinical electromyography / S. G. Nikolaev. – Ivanovo, 2013. – 394 p.
7. Esteban, A. A neurophysiological approach to brainstem reflexes. Blink reflex / A. Esteban // Neurophysiol. Clin. – 1999, Feb. – Vol. 29, № 1. – P. 7-38.
8. Sandrini, G., Alfonsi E., Ruiz L. et al. Age-related changes in excitability of nociceptive flexion reflex. An electrophysiological study in school-age children and young adults / G Sandrini, E. Alfonsi, L. Ruiz et al. // Funct. Neurol. – 1989, Jan-Mar. – Vol. 4, № 1. – P. 53-58.